

VŠB-Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a
informatiky
Katedra elektroniky

Lineární proudové čidlo s PWM
Linear Current Sensing with PWM

2010

Jakub Řehák

Zadání bakalářské práce

Student:

Jakub Řehák

Studijní program:

B2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

2602R014 Aplikovaná a komerční elektronika

Téma:

Lineární proudové čidlo s PWM
Linear Current Sensing with PWM

Zásady pro vypracování:

1. Uveďte možnosti a způsoby snímání proudu ve výkonových měničích
2. Navrhněte a realizujte jednoduché čidlo proudu s výstupem PWM
3. Měřením ověřte vlastnosti realizovaného zapojení

Seznam doporučené odborné literatury:


Podle pokynů vedoucího závěrečné práce

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

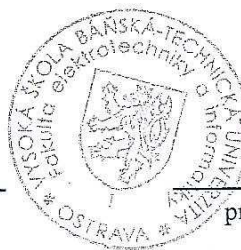
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Tomáš Pavelek, Ph.D.**


Datum zadání: 20.11.2009

Datum odevzdání: 07.05.2010



doc. Ing. Petr Palácký, Ph.D.
vedoucí katedry





prof. Ing. Ivo Vondrák, CSc.
děkan fakulty

„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně.
Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě 7.5.2010

.....
Podpis

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Tomáši Pavelkovi, Ph.D., za cenné připomínky, vstřícnou spolupráci a trpělivost.

Abstrakt

Cílem bakalářské práce je popsat způsoby a možnosti snímání proudu ve výkonových měničích. Práce se zaměřuje na jednotlivé typy senzorů, jakými jsou senzory s optoizolátory, senzory s magnetickou vazbou, senzory založené na technologii Fluxgate a integrované senzory motorového proudu.

Úkolem praktické části je realizovat jednoduché proudové čidlo s PWM a měřením ověřit jeho vlastnosti.

Klíčová slova

proud, senzor proudu, optoelektrický vazební člen, Hallův jev, senzor s magnetickou vazbou, technologie Fluxgate, integrovaný proudový senzor, IR2172

Abstract

The aim of my thesis is to describe ways and possibilities of current reading in static power converters. The thesis deals with several types of sensor, for example image sensor, sensor with magnetic coupling, sensors based on Fluxgate technology and integrated sensors of motor current.

The aim of practical part is to realization of simple current sensor with PWM and verify its qualities by measuerement.

Key words

current, sensor, opto-isolator, Hall effect, sensor with magnetic coupling, Fluxgate technology, integrated current sensor, IR2172

Seznam použitých symbolů a zkratk

SI	Soustava jednotek
A	Ampér
V	Volt
AC	Střídavý (proud, napětí)
st	Střídavý (proud, napětí)
DC	Stejnoseměrný (proud, napětí)
ss	Stejnoseměrný (proud, napětí)
I_m	Amplituda střídavého proudu
ω	Úhlová frekvence
φ_0	Počáteční fáze
φ	Fázové posunutí
I_F	Proud fotodiody
I_D	Proud luminiscenční diody
I_{D0}	Příslušný klidový proud luminiscenční diody
I_{F0}	Příslušný klidový proud fotodiody
U_H	Hallovo napětí
R_H	Hallova konstanta polovodičové desky
B	Magnetické pole
I_k	Referenční hodnota proudu
h	Tloušťka desky Hallova generátoru
U_{ref}	Referenční napětí
I_p	Primární proud
I_s	Sekundární proud
R_m	Měřicí rezistor
PWM	Pulzně šířková modulace
HVIC	Integrovaná vysokonapěťová technologie
IGBT	Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem
PSRR	Poměr potlačení vlivu kolísání napájecího napětí
IO	Integrovaný obvod
OP	Operační zesilovač
I_z	Proud na zátěži
U_z	Napětí na zátěži
f_m	Mezní frekvence

Obsah:

1	Úvod:.....	9
2	Základní pojmy z oboru měření elektrického proudu	10
2.1	Elektrický proud.....	10
2.2	Druhy elektrického proudu podle časového průběhu.....	10
2.2.1	Střídavý proud.....	10
2.2.2	Stejnoseměrný proud.....	10
2.3	Čidla proudu.....	11
3	Čidla s optoizolátory	11
3.1	Čidla s přenosem analogového signálu	12
3.2	Čidlo s přenosem impulzního signálu	13
4	Čidla s magnetickou vazbou	14
4.1	Princip Hallova jevu.....	14
4.2	Hallův jev v proudových snímačích.....	15
4.3	Hallový snímač s otevřenou smyčkou	15
4.3.1	Princip, konstrukce a základní vlastnosti	15
4.3.2	Výhody a nevýhody otevřené smyčky:	16
4.3.3	Přesnost měření:	16
4.3.4	Jmenovitý a maximální proud:	16
4.3.5	Typické aplikace:	16
4.4	Hallový snímač s uzavřenou smyčkou	17
4.4.1	Princip a konstrukce	17
4.4.2	Výhody a nevýhody uzavřené smyčky:.....	18
4.4.3	Přesnost měření:	18
4.4.4	Typické aplikace:	19
4.5	ETA snímač s Hallovým generátorem.....	19
4.5.1	Princip a konstrukce	19
4.5.2	Výhody a nevýhody snímačů ETA	20
4.5.3	Přesnost měření	20

4.5.4	Jmenovitý a maximální proud	21
4.5.5	Dynamické vlastnosti	21
4.5.6	Typické aplikace	21
5	Technologie Fluxgate	21
5.1	Snímače typu C s indukční bránou	21
5.1.1	Princip a konstrukce	21
5.1.2	Snímače typu CT s indukční bránou	22
5.1.3	Typická aplikace CT snímačů	23
5.2	Snímače typu CD s indukční bránou	23
5.2.1	Typická aplikace CD snímačů	23
6	Vysokonapěťové integrované proudové snímače	24
6.1	Monolitický proudový senzor ve formě integrovaného obvodu	24
6.2	Využití motorových proudových snímačů	25
7	Realizace čidla proudu s výstupem PWM (IR2172)	27
7.1	Charakteristika čidla proudu:	27
7.2	Základní funkce a realizace čidla	27
7.2.1	Obvod Bootstrap	28
7.3	Získání analogového proudového signálu na výstupu	29
7.3.1	Pasivní filtry	29
7.3.2	Aktivní filtry	29
7.3.3	Propojení výstupu s digitálními obvody	30
8	Měření na čidle proudu IR2172 s výstupem PWM	33
8.1	Ověření linearity čidla proudu	34
8.2	Měření fázového proudu na jednofázovém a trojfázovém střídači	35
9	Závěr	40

1 Úvod:

Předmětem mé bakalářské práce je zpracování problematiky proudových čidel. Předkládaná závěrečná práce si klade za cíl objasnit možnosti a způsoby snímání proudu ve výkonových měničích. Stěžejní část práce a jejím hlavním cílem je realizace jednoduchého lineárního proudového čidla s PWM. Problematiku týkající se proudového čidla s PWM doplňuji o ověření jeho vlastností měřením tohoto čidla.

V úvodních kapitolách se snažím představit základní pojmy z oboru měření elektrického proudu. Zabývám se zde definicí čidla, co čidlo tvoří a co musí splňovat, jako například galvanické oddělení. To zajišťují například optoizolátory. Použití optoelektrických vazebních členů můžeme rozdělit do dvou skupin. V prvním případě je to použití pro přenos analogových signálů a ve druhém použití pro přenos impulzních signálů.

V další části práce se zabývám čidly proudu s magnetickou vazbou fungující na principu Hallova jevu. K tomu, abychom pochopili jejich základní funkci, je třeba nastínit podstatu Hallova generátoru. Jsou propracovány dva principy analogového měření proudu. Princip otevřené smyčky a princip uzavřené smyčky, která kompenzuje magnetické pole. Oba tyto principy měří střídavý i stejnosměrný proud a zajišťují galvanické oddělení.

Rovněž je důležité poukázat na snímače proudu založené na technologii Fluxgate. Technologie Fluxgate zahrnuje několik typů proudových snímačů. Jejich konstrukce je podobná čidlům s uzavřenou smyčkou. Rozdíl spočívá v nahrazení Hallova generátoru indukčním snímacím prvkem.

V následujících kapitolách se zaměřuji na popis technologie vysokonapětových snímačů motorového proudu, které na trh uvedla firma International Rectifier.

Úkolem praktické části je navrhnout jednoduché čidlo proudu s PWM. Realizace zapojení je provedena senzorem IR2172 s přímým výstupem PWM. Aby byla dodržena galvanická izolace čidla proudu od ostatní elektroniky, je do obvodu zapojen optočlen. Napájení je provedeno dvěma transformátory. Jsou použity dva filtry typu dolní propust, a to dvoupólový aktivní filtr Butterworth a jednopólový pasivní filtr RC k odfiltrování nosné frekvence PWM. Měřením je testována linearita tohoto čidla. Ověření vlastností čidla proudu doplňuji snímáním proudu na jednofázovém a trojfázovém střídači s odporovou zátěží a odezvou senzoru na jednotkový skok.

2 Základní pojmy z oboru měření elektrického proudu

2.1 Elektrický proud

Elektrický proud je uspořádaný pohyb volných částic s elektrickým nábojem. Uspořádaný pohyb znamená, že se většina elektronů pohybuje jedním směrem. Není-li vodič připojen ke svorkám zdroje (a není-li tedy důvod, aby elektrický proud procházel), elektrony se i tak pohybují, ale chaoticky. Volné částice jsou ty, které nejsou silově vázány k jiným částicím (např. k jádrům atomů). Volné elektrony se ve vodiči pohybují od záporného ke kladnému pólu (proti směru elektrické intenzity). Elektrický proud nemusí být jen pohyb volných elektronů, může se jednat i o kladně nabitě částice, které se pak pohybují ve směru elektrické intenzity. Elektrický proud může být tvořen i částicemi obojího znaménka (např. v polovodičích). Směr elektrického proudu je tedy určen dohodou: Směr elektrického proudu je dán směrem uspořádaného pohybu kladně nabitých částic.

Elektrický proud je stejnojmenná fyzikální veličina obvykle označená I , vyjadřuje množství elektrického náboje, které projde průřezem vodiče za jednotku času. Proud v běžných elektrických rozvodech může být střídavý a stejnosměrný. Jednotka a značka proudu v SI: Ampér [A]. [1]

2.2 Druhy elektrického proudu podle časového průběhu

2.2.1 Střídavý proud

Střídavý proud je elektrický proud, který mění v čase svůj směr a velikost s určitou periodou. Střídavý proud definujeme jako proměnný proud se sinusovým průběhem. Tvar dalších průběhů může být například obdélníkový, pilovitý nebo libovolně jiný. Označuje se také zkráceně jako AC nebo *st.*,

$$i(t) = I_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_0 + \varphi) \quad (1)$$

kde I_m je amplituda střídavého proudu, ω je úhlová frekvence, φ_0 je počáteční fáze střídavého napětí, φ je fázový posuv mezi proudem a napětím.

2.2.2 Stejnosměrný proud

Stejnosměrný proud je elektrický proud, který má stále stejnou velikost a stejný směr na rozdíl od proudu střídavého. Označuje se rovněž zkráceně jako DC nebo *ss.*

2.3 Čidla proudu

Čidla, snímače jsou zařízení, které slouží pro snímání a měření fyzikálních veličin.

Snímač (také nazýván jako senzor, převodník, detektor) je funkční prvek, tvořící vstupní část měřicího řetězce, obvykle v kompaktním provedení, výstupem je obvykle unifikovaný elektrický signál.

Čidlo je citlivá část snímače, transformuje sledovanou fyzikální veličinu na jinou, nejčastěji elektrický signál. Čidla tvoří i elektronické obvody pro zpracování signálu. Čidlo tedy informaci snímá, zpracovává a vyhodnocuje pro další použití. Zároveň musí čidlo zajistit galvanické oddělení. To zajišťují optoizolátory nebo transformátory.

3 Čidla s optoizolátory

Optoizolátor je zařízení, které používá krátké optické přenosové cesty k přenosu elektrických signálů mezi jednotlivými prvky obvodu, tedy typický vysílač a přijímač. Je elektricky izolovaný, protože elektrický signál je přeměněn na světelný paprsek, který je přemístěn do druhé části obvodu a zpět převeden na elektrický signál. Není třeba, aby jednotlivé části obvodu byly elektricky spojené.

Optoizolátor je jednoduše balíček, který obsahuje infračervené světlo emitováno diodou (LED) a fotosnímač jako například fotosenzitivní křemíkové diody, fototranzistory nebo křemíkové řízené usměrňovače. Ostatní obvody jako například zesilovač může být součástí balení. Optoizolátor je obvykle chápán jako jeden integrovaný soubor, ale optoizolace může být dosaženo také pomocí samostatných zařízení. [5]

Optoelektrické vazební členy se dají využít dvěma způsoby. První z nich slouží pro přenos analogových signálů a druhý umožňuje přenos impulzních signálů.

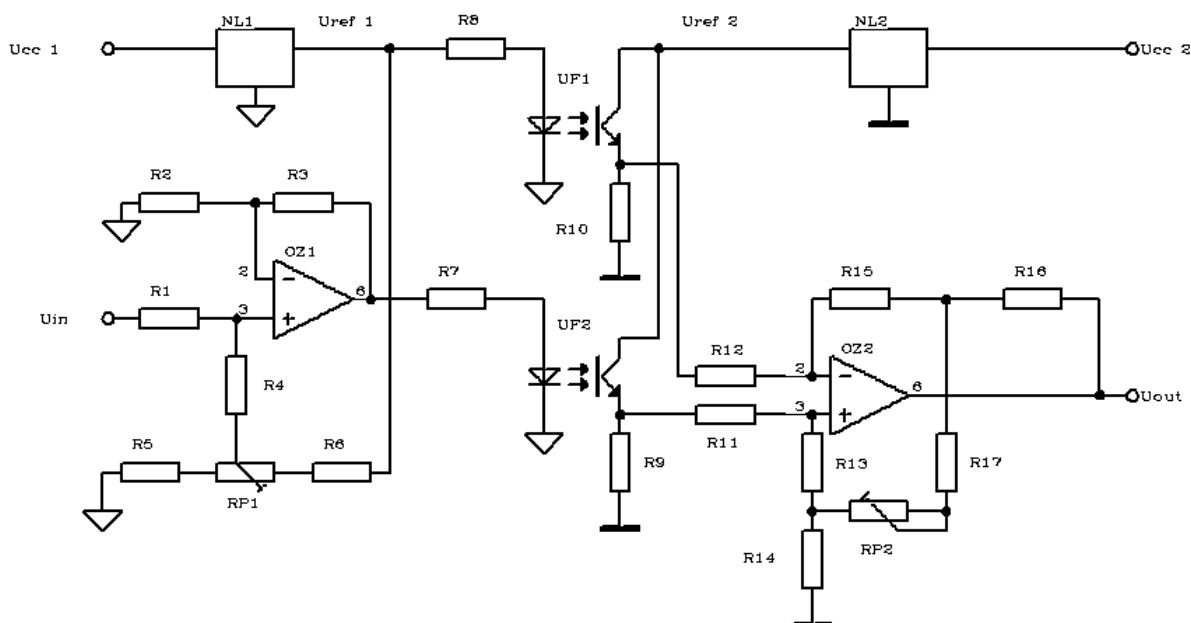
3.1 Čidla s přenosem analogového signálu

V zapojení (viz obr. č. 1) slouží optočlen *UF1* pro nastavení a teplotní stabilizaci pracovního bodu a optočlen *UF2* pro přenos měřeného signálu. Pokud není na vstupu přítomen žádný signál, protéká oběma diodami stejný proud a z toho vyplývá, že i úbytky napětí na emitorových odporech fototranzistorů jsou stejné. Toto napětí pak postupuje do rozdílového zesilovače, kde se vyhodnocuje, a na výstupu bude tedy napětí nulové. Pokud na vstup přivedeme nenulový signál, změní se proud optočlenu *UF2* a díky tomu se změní napětí na rezistoru *R9*. Napětí na výstupu čidla je úměrné vstupnímu napětí. Změní-li se okolní teplota, dojde ke změně parametrů obou čidel, a tím pádem zůstane výstupní napětí stejné.

Nevýhodami je například značná teplotní závislost parametrů optočlenu a nelinearita přenosové funkce elektrického vazebního členu, kterou lze aproximovat vztahem:

$$I_F = I_{FO} \left(\frac{I_D}{I_{DO}} \right)^n \quad (2)$$

kde I_F je proud fotodiody, I_D proud luminiscenční diody, I_{DO} a I_{FO} jsou příslušné klidové proudy a n je činitel nelinearity optočlenu.



Obr. č. 1: Čidlo proudu s optočleny

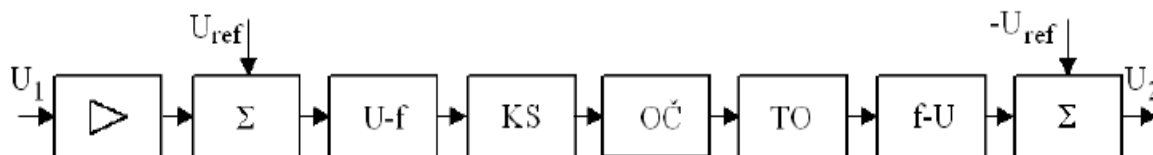
3.2 Čidlo s přenosem impulzního signálu

Použití optočlenů pro přenos impulzivních signálů je vhodnější než pro přenos analogových signálů, protože naráží na značné problémy, které jsem zmínil již výše. Je to způsobeno tím, že u přenosu impulzivních signálů není nositelem amplituda, ale frekvence nebo délka pulsu.

V zapojení jsou použity dva převodníky $U-f$, $f-U$, které musí mít shodné převodní charakteristiky. Proto jsou oba zapojeny s obvodem fázového závěsu. Z prvního obvodu je využit pouze napětím řízený oscilátor ($U-f$) a druhý obvod pracuje jako frekvenční demodulátor.

Nejdříve napětí U_1 vstupuje do zesilovače, pak do sumátoru, kde se sčítá s napětím referenčním U_{ref} , kterým se nastavuje klidová pracovní frekvence převodníku $U-f$. Signál z převodníku je výkonově zesílen pro buzení optočlenu.

Galvanicky oddělený signál je upraven tvarovacím obvodem a převodníkem $f-U$ je získán zpět analogový signál. Od tohoto signálu je třeba odečíst referenční napětí, abychom oddělili ss napětí klidového pracovního bodu. [4]



Obr. č. 2: Čidlo s frekvenční modulací

4 Čidla s magnetickou vazbou

Ve výkonové elektronice není vhodné ke snímání proudu a napětí neharmonických střídavých i stejnosměrných průběhů použití měřicího transformátoru. Čidla s magnetickou vazbou fungující na principu Hallova jevu se v současné době používají nejčastěji.

4.1 Princip Hallova jevu

Podstatou Hallova generátoru je tenká polovodičová destička, která je podélně protékána referenčním proudem I_k . Je-li tato destička vložena do vnějšího magnetického pole, pak jsou ovlivňovány volné elektrony tohoto proudu. Takto vzniká síla, která je kolmá na směr proudu I_k i na měř. magnetické indukce (tzv. Lorentzova síla), která vychyluje volné elektrony referenčního proudu k jedné straně polovodičové desky. To má za následek, že na jedné straně polovodičové desky bude nadbytek volných elektronů, ale na druhé jich bude nedostatek.

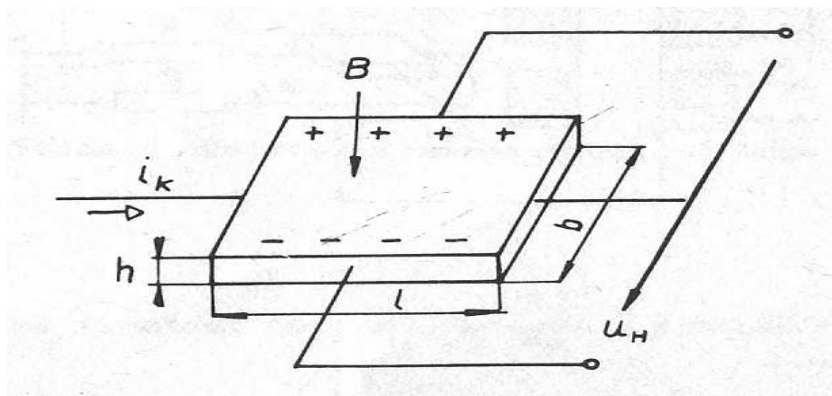
Rozdíl potenciálů těchto dvou pólů se nazývá Hallovo napětí, pro které platí:

$$U_H = R_H \frac{B \cdot i_k}{h} \quad [V, m^3 A^{-1} s^{-1}, A, T, m, V] \quad (3)$$

kde R_H je Hallova konstanta polovodičové desky, která je závislá na materiálu desky a také na teplotě

h je tloušťka desky,

I_k je referenční hodnota proudu.



Obr. 3: Hallův generátor

4.2 Hallův jev v proudových snímačích

Současný trend vývoje moderní výkonové elektroniky vyžaduje trvale bezpečnou funkci, kompaktní velikost, výhodný poměr ceny k výkonu a snadnou manipulaci. [7]

4.3 Hallovy snímače s otevřenou smyčkou

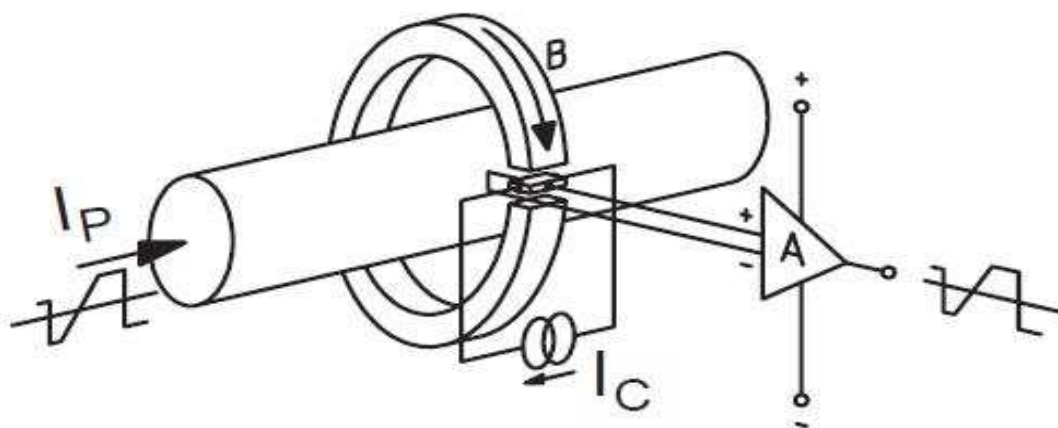
4.3.1 Princip, konstrukce a základní vlastnosti

Kolem vodiče, který je protékán proudem, se vytváří magnetické pole. Na měření tohoto pole je založen základní funkční princip snímání proudu. Toto magnetické pole je soustředěno magnetickým jádrem. Prochází-li vodič otvorem v magnetickém obvodu proudového snímače, je magnetický tok soustředěn do vzduchové mezery, která je vyříznutá v jádře, kde je umístěn Hallův generátor, který měří intenzitu magnetického toku. Výstupní napětí U_h Hallova generátoru je tedy závislé na proudu vodičem.

Hallův generátor poskytuje lineární závislost mezi Hallovým napětím a magnetickým tokem. Rozdílový zesilovač a Hallův generátor je napájen z externího zdroje.

Změřený signál je kompenzován pro odstranění vlivu teplotního driftu a poté zesílen podle požadavku uživatele na výstup. [6]

Hallovy snímače s otevřenou smyčkou zajišťují galvanické oddělení primárního a sekundárního obvodu a měří střídavý i stejnosměrný proud.



Obr. 4: Snímač s Hallovým generátorem a otevřenou smyčkou

4.3.2 Výhody a nevýhody otevřené smyčky:

Mezi výhody patří:

- velmi kompaktní konstrukce bez sekundárního vinutí,
- nízká cena, hmotnost a malé rozměry,
- nízká proudová spotřeba nezávislá na měrné hodnotě,
- vysoká odolnost vůči přetížení.

Nevýhodami jsou nižší přesnost, dynamika a teplotní stabilita.

4.3.3 Přesnost měření:

Přesnost měření u Hallových snímačů s otevřenou smyčkou dosahuje i několika procent.

Celková přesnost je ovlivněna následujícími činiteli:

- hladina šumu na výstupu,
- chyba zesilovače (teplotní drift),
- magnetický offset,
- DC offset při nulovém proudu (Hallův generátor),
- linearita (nedokonalost materiálu jádra, Hallova generátoru a elektroniky).

4.3.4 Jmenovitý a maximální proud:

Rozsah snímačů s otevřenou smyčkou je pro měření proudu od jednotek ampér po desítky kiloampér. V závislosti na použitém materiálu pro výrobu magnetického obvodu se mění maximální měřitelný proud. Platí, že maximální krátkodobý proud se rovná až 300% jmenovitému proudu. Snímač je však schopen vydržet až desetinásobek jmenovitého proudu, ale tento proud má za následek přesycení jádra, které pak musí projít procesem odmagnetování. [6]

4.3.5 Typické aplikace:

Tento měřicí systém se používá pro snímače proudu v rozsazích 5-1000 A.

Typické aplikace:

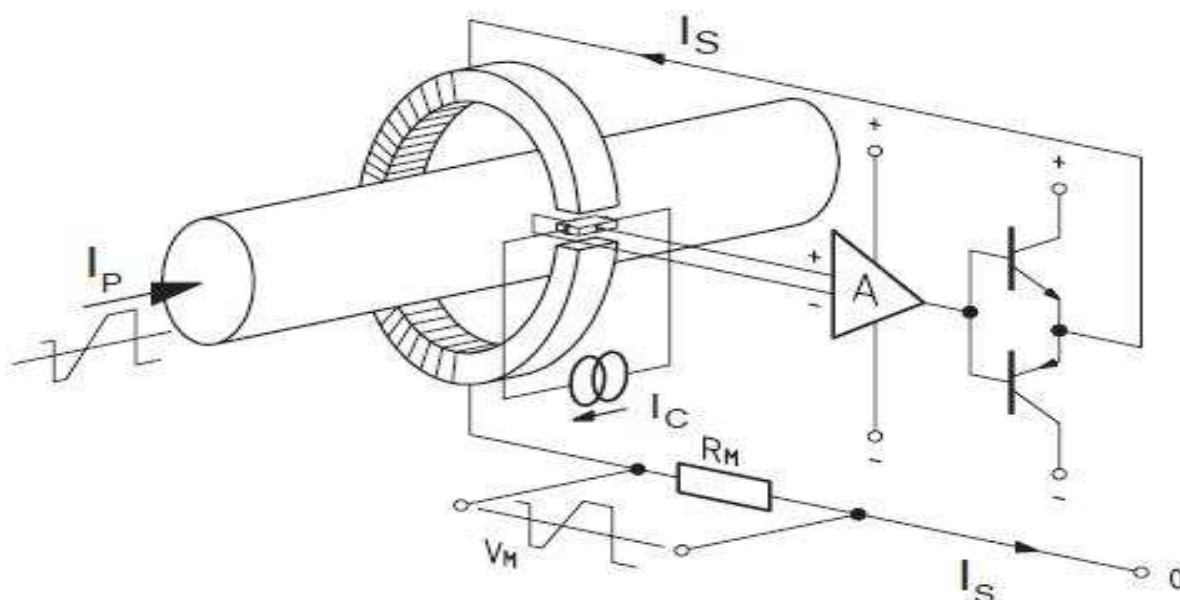
- kompenzátory účinníku,
- měniče a pohony pro měření vstupních a výstupních proudů,
- silniční a trakční motorová vozidla při regulaci výkonu či momentu výkonu,
- UPS zdroje při měření nabíjecích a vybíjecích proudů.

4.4 Hallový snímače s uzavřenou smyčkou

4.4.1 Princip a konstrukce

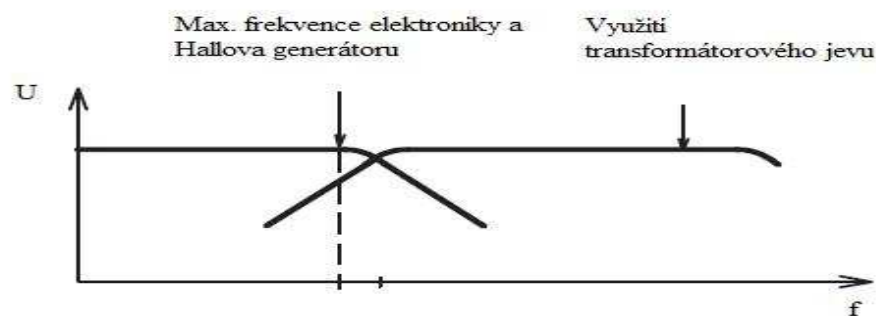
Princip uzavřené smyčky má podstatně lepší vlastnosti než princip otevřené smyčky. Je to dáno tím, že uzavřená smyčka pracuje na základě vyhodnocování nulového magnetického toku v jádře. Každá odchylka od nulového vyvážení vede k Hallovu napětí Hallova generátoru, které určuje velikost kompenzačního proudu v sekundárním vinutí. Elektronický obvod ihned dodá sekundární proud I_s potřebný ke kompenzaci magnetického pole. Magnetický tok vytvořený proudem primárním je tedy zcela vyrovnáván opačným magnetickým tokem vinutí, vytvořený proudem sekundárním magnetického obvodu. V tomto okamžiku sekundární proud I_s představuje vysoce přesný obraz primárního proudu I_p , což vyplývá ze vztahu:

$$N_p \cdot I_p = N_s \cdot I_s \Rightarrow \frac{I_p \cdot N_p}{N_s} \quad [A, A, \text{závity}, \text{závity}] \quad (4)$$



Obr. č. 5: Snímač s Hallovým generátorem a uzavřenou smyčkou

Tento proud je tedy zmenšenou kopií a můžeme jej měřit buď přímo (měřícím přístrojem), nebo zapojením měřícího rezistoru R_M , na kterém získáme napěťový výstup představující přesný obraz primárního proudu. Poměr velikosti výstupního napětí a primárního proudu je dán velikostí odporu měřícího rezistoru a počtem závitů. [6]



Obr. č. 6: Šířka pásma Hallova generátoru a proudového transformátoru

Při kmitočtech nad 3 až 5 kHz působení elektroniky postupně slábne. Při vysokých frekvencích a rychlých změnách proudu, pracuje sekundární cívka jako proudový transformátor. Superpozice těchto dvou účinků činí z tohoto čidla zařízení měřící proud velmi přesně a velmi dynamicky. Konstrukce snímačů s uzavřenou smyčkou nabízí výbornou šířku pásma od stejnosměrných proudů po 200 kHz. Problém je v zajištění přesnosti měření v celém pásmu a konstantní odezvy. Hallovy snímače proudu zajišťují galvanické oddělení a měří stejnosměrný i střídavý proud. [6][7]

4.4.2 Výhody a nevýhody uzavřené smyčky:

Mezi výhody patří zejména výborná linearita, vysoká přesnost a přetížitelnost, velká šířka pásma, velmi rychlá odezva a nízký teplotní drift.

Nevýhodami jsou velké nároky na napájení sekundárního vinutí a vyšší cena.

4.4.3 Přesnost měření:

Nejdůležitějším parametrem nepřesnosti je zbytkový magnetický tok, který je příčinou, že kompenzační proud není skutečným obrazem primárního proudu. Přesnost měření dosahuje 0,5 %. Celková přesnost navíc závisí na následujících jevech:

- nelineárnost Hallova generátoru, elektroniky a magnetického obvodu,
- nepřesnost měřícího rezistoru,
- výstupní offset pro nulový primární proud.

Jak již bylo řečeno výše, snímač pracuje za ideálních podmínek s nulovým magnetickým tokem. Navzdory této skutečnosti může nastat magnetický offset, když:

- napájení sekundárního obvodu nemá požadované parametry,
- na čidlo působí externí magnetické pole,
- při nízké frekvenci proud překročí měřící rozsah.

4.4.4 Typické aplikace:

Měřicí systém s kompenzací se používá ve snímačích proudu v rozmezí 25 – 10000 A.

Používá se pro aplikace, kde je vyžadována vysoká linearita a přesnost, rychlá odezva a nízký teplotní šum (drift), jako je:

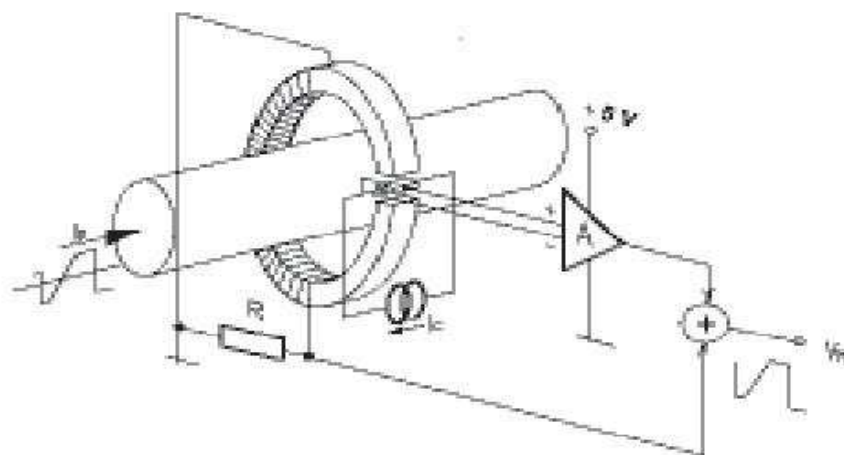
- proudová zpětná vazba,
- robotika,
- široko pásmové zdroje,
- svařovací stroje,
- sledování rychlých přechodových jevů v elektronice.

4.5 ETA snímače s Hallovým generátorem

4.5.1 Princip a konstrukce

ETA je název řeckého symbolu 'η', který představuje účinnost. Tyto snímače dostaly označení ETA, protože jsou charakteristické malou spotřebou. Pokud jde o provedení, technologie ETA snímače spadá mezi technologii otevřené smyčky a uzavřené smyčky. Protože konstrukce je podobná snímačům uzavřené smyčky, nenabízí tato technologie žádné cenové zvýhodnění. ETA snímače mají se snímačem uzavřené smyčky stejný tvar magnetického obvodu, Hallův generátor a sekundární vinutí. Rozdíly spočívají v detailech magnetického jádra a řídicí elektronice, které vedou k specifickým vlastnostem ETA snímačů: [10]

- při nízkých frekvencích fungují jako otevřené smyčky. Výstupní signál je závislý na napětí Hallova generátoru, které je úměrné primárnímu proudu. Viz. kap. 4.3.1,
- při vyšších frekvencích fungují jako transformátory proudu. Výstupní proud je přesným obrazem primárního proudu. Což je typické pro snímače s uzavřenou smyčkou. Viz. kap. 4.4.1.



Obr. č. 7: Snímač typu ETA

4.5.2 Výhody a nevýhody snímačů ETA

Jejich hlavními výhodami je nízká spotřeba a nízké sekundární napájecí napětí jako je unipolární napájení 5 V. ETA snímače jsou schopné měřit stejnosměrný i střídavý proud a zajišťují galvanické oddělení. S vyšší frekvencí se vyznačují velmi dobrou přesností, odezvou a zanedbatelným teplotním driftem.

Hlavní nevýhodou technologie ETA je při návrhu magnetického obvodu snímače nutné určit jeho vhodnou velikost a tvar. Pro ideální funkci otevřené a uzavřené smyčky je vyžadován odlišný magnetický obvod. A díky této odlišnosti dochází k zhoršení parametrů snímače i za podmínky, kdy bude zvolen nejvhodnější kompromis. [6]

4.5.3 Přesnost měření

Přesnost snímače ETA je závislá na velikosti pracovní frekvence:

- pro nízké frekvence se celková přesnost pohybuje okolo několika jednotek procent,
- pro vyšší frekvence je celková přesnost typicky pod jedno procento.

4.5.4 Jmenovitý a maximální proud

Rozsah ETA snímačů je vyroben pro jmenovité proudy od 25 A do 150 A. Tento poměrně úzký rozsah není omezen z hlediska technického, ale spíše obchodního. Pro proudy menší nebo rovné 25 A a vyšších než 150 A je levnější použít čidlo s uzavřenou smyčkou. U daného snímače je pro nízkou frekvenci maximální proud určen vlastnostmi otevřené smyčky a pro vysokou frekvenci určen vlastnostmi uzavřené smyčky.

4.5.5 Dynamické vlastnosti

Šířka pásma, doba odezvy a chování snímačů ETA je podobné jako u snímačů s uzavřenou smyčkou, i když může nastat mírná redukce parametrů použitím méně účinného magnetického obvodu. Šířka pásma bývá 100 KHz a více. ETA snímače vykazují rychlou reakční dobu lepší než 1 μ s.

4.5.6 Typické aplikace

ETA proudové snímače se používají v mnoha průmyslových aplikacích obecně jako důležitý prvek při regulacích (pro proud, moment, sílu, rychlost, pozice zpětné vazby), ale i pro současné sledování a zobrazení. Příklady aplikací jsou podobné těm jako u snímačů s otevřenou a uzavřenou smyčkou.

5 Technologie Fluxgate

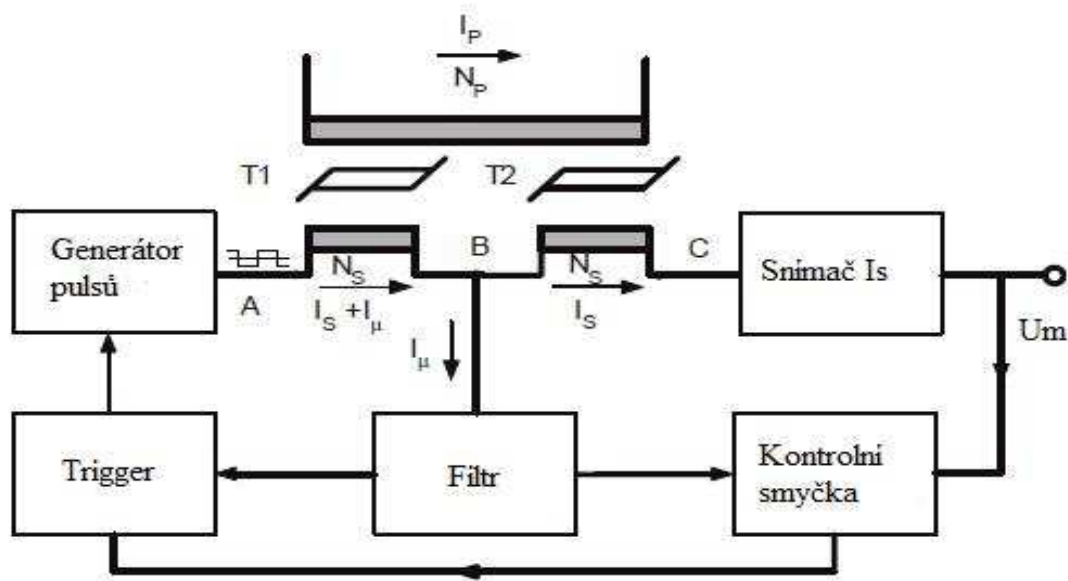
Indukční technologie Fluxgate zahrnuje několik typů proudových snímačů. Magnetické pole tvořené primárním proudem je měřeno speciálním snímacím prvkem, který je řízen po B-H křivce pomocí sekundárního vinutí. Výsledné magnetické účinky jsou používány k vyhodnocení primárního proudu. Pro snímání intenzity magnetického pole a jeho řízení, existuje široké spektrum metod, ale všechny případy jsou založeny na stejném principu. [6]

5.1 Snímače typu C s indukční bránou

5.1.1 Princip a konstrukce

Snímače typu C jsou provedeny se dvěma shodnými magnetickými jádry (T1 a T2), na kterých je vinutí se stejným počtem závitů (NS). Obě jádra mají společné primární vinutí (NP). Obě sekundární vinutí jsou zapojeny do série a jejich společný středový bod je také připojen k elektronice. Jedno jádro pracuje jako proudový transformátor k měření proudu vysoké frekvence, zatímco druhé jádro využívá princip Fluxgate pro nízkou frekvenci. Sekundární vinutí navíc zajišťují nulový magnetický tok v jádrech a působí jako kompenzační vinutí. Tato konstrukce umožňuje napájení sekundární části jádra T1 proudem I_p i proudem I_s . Filtr poté odstraní proud I_p a předejde tím šumu na výstupu. [6]

Platí: $I_s = I_p \cdot \frac{N_p}{N_s}$ [A; A; počet závitů; počet závitů] (5)



Obr. č. 8: snímač typu C

Snímače typu C nabízí velmi vysoký výkon, dobrou přesnost, nízký teplotní drift a vyznačují se malou dobou odezvy. Dvě nejběžnější varianty C snímačů prodáváných na trhu jsou popsány níže.

5.1.2 Snímače typu CT s indukční bránou

Snímače typu CT měří proudy do 150 A. Vyznačují se pozoruhodnou šířkou pásma do 500 kHz. Jejich přesnost měření je standardně 0.1 %.

Mezi jejich hlavní výhody patří:

- vynikající přesnost v celém rozsahu provozních teplot,
- extrémně krátká doba odezvy,
- výborná odolnost proti vnějšímu magnetickému rušení,
- odolnost proti krátkodobému přetížení.

Jejich hlavní nevýhodou je, že se do primárního vinutí indukují napěťové pulsy obvykle o frekvenci 500 Hz, způsobené budícím obdélníkovým napětím na sekundárním vinutí jádra T1. Tyto pulsy se indukují do sekundárního vinutí jádra T2 a způsobují šum na výstupu. [6]

5.1.3 Typická aplikace CT snímačů

Snímače se používají v průmyslových aplikacích, kde se vyžaduje velmi vysoká přesnost a teplotní stabilita. Využívají se při:

- měření proudu pro trakční vozidla,
- měření proudu pro systémy s indukčním ohřevem,
- měření proudu pro nabíjení a vybíjení baterií.

5.2 Snímače typu CD s indukční bránou

Snímač typu CD je určen pro měření rozdílu dvou primárních proudů, které tečou v opačném směru. Jejich přesnost měření je standardně 0.1 %. Jejich hlavní nevýhodou je, že snímač nemůže pracovat jako proudový transformátor, protože každé sekundární vinutí je využíváno jedním směrem proudu, a tím je omezena maximální měřitelná frekvence 2 kHz. [6]

5.2.1 Typická aplikace CD snímačů

Snímače se používají v průmyslových aplikacích, kde se vyžaduje velmi vysoká přesnost a teplotní stabilita. Používají se v aplikacích jako například pro:

- detekci proudu pro drážní vozidla,
- snímač pro omezovače proudu,
- náhradu za rozdílové relé.

6 Vysokonapěťové integrované proudové snímače

V této kapitole se budu zabývat monolitickými integrovanými senzory motorového proudu, které na trh nedávno uvedla firma International Rectifier. Tento senzor je založen na patentované vysokonapěťové technice a je první svého druhu v průmyslu. Tento integrovaný obvod umožňuje integraci a zjednodušení pohonů na střídavý proud a zrychluje funkční zdokonalení inteligentních výkonových modulů (Intelligent Power Module).

Obvod pro snímání motorového proudu představuje důležitý prvek u pohonů s motory na střídavý proud. V předchozích kapitolách jsem se zmiňoval o použití proudových snímačích na bázi Hallova jevu a snímačích s optoizolátory. Avšak tyto obvody ve většině případů znemožňují další zmenšování rozměrů a zjednodušení střídavých pohonů s invertory v důsledku svých značných mechanických rozměrů a počtu přídatných periferních zařízení.

Požadavky na lineární proudové snímače:

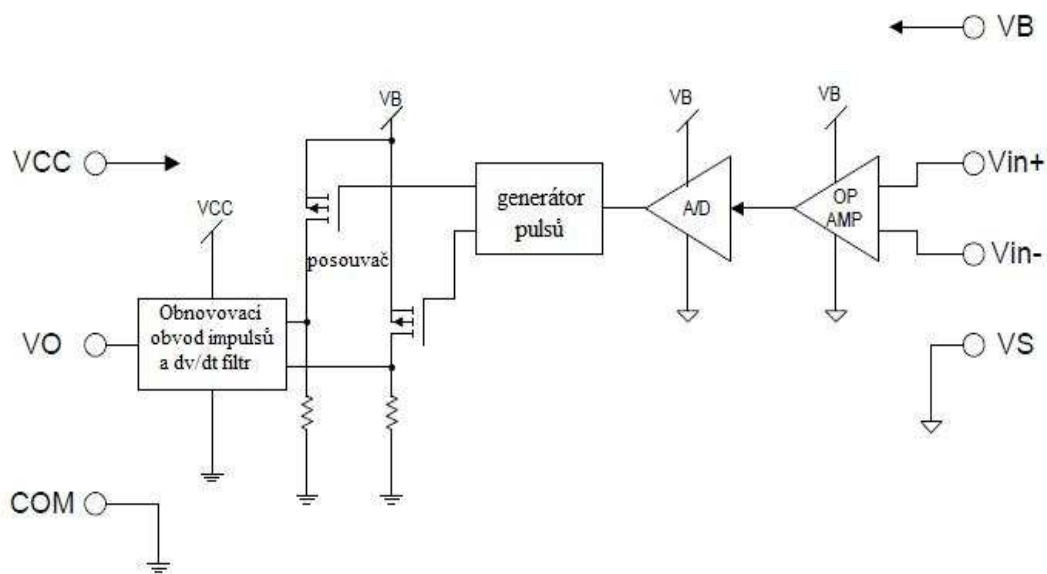
- nízký sekundární výkon ve spojení s napájením typu bootstrap s integrovaným obvodem HVIC s řídicím hradlem,
- nízký PSRR (poměr potlačení vlivu kolísání napájecího napětí) s širokým rozsahem napájecího napětí,
- vysoká přesnost, nízký teplotní rozptyl, náležitá šířka pásma,
- vysoká šumová odolnost u motorů řízených PWM,
- jednoduchá a snadno vyrobitelná konstrukce.

Běžné obvody – ať už na základě Hallova jevu, nebo senzory s optickou vazbou nesplňují některá z výše uvedených kritérií. Nově vyvinuté obvody IR217x je splňují.

V následující části se budu zabývat hlavními principy tohoto IO. [9]

6.1 Monolitický proudový senzor ve formě integrovaného obvodu

Integrovaný obvod IR217x představuje lineární proudový snímač na bázi monolitického integrovaného obvodu. Na obr. č. 9 je znázorněno funkční blokové schéma integrovaného obvodu IR217x.



Obr. č. 9: IR217x funkční blokové schéma

Vnitřní obvod je rozdělen do dvou hlavních úseků: s vyšším a nižším napětím. Vysokonapěťové úrovně posouvače izolují tyto dva obvody a umožňují vytvoření dvou nezávislých referenčních zemních potenciálů v jednom monolitickém integrovaném obvodu. Tento obvod na straně vyššího napětí vykonává většinu důležitých funkcí jako je funkce vysoce přesného operačního zesilovače OP, analogově digitálního převodníku A/D a impulzního generátoru. Jsou zde dva P kanály úrovněových posouvačů, které převádějí digitální PWM informaci z části s vyšším napětím do části s nižším napětím prostřednictvím zadní hrany impulsu. Část s nižším napětím obsahuje jednoduché obvody jako obnovovací obvod PWM impulsů, dv/dt filtr a výstupní buffer. Zásadní inovace a dosažené výhody spočívají v obvodu s vyšším napětím.

Hlavní výhody tohoto vysoce přesného lineárního proudového snímače představuje technika monolitické integrace, nízká výkonová spotřeba na straně sekundárního napájecího napětí, široké rozmezí sekundárního napájecího napětí a nízký teplotní rozptyl.

6.2 Využití motorových proudových snímačů

U motorových pohonů se často vyžaduje fázová proudová zpětná vazba. Aby bylo možno snímat fázový proud, je ideální zapojit senzory do série s výstupním fázovým vedením, protože se tím získá proudový průběh základní frekvence motoru.

Aplikace fázového proudu motoru se většinou používají k dvojímu účelu – řízení a monitorování. Pro účely řízení je rozhodující linearita, přesnost, offsetový teplotní drift a šířka pásma. Na monitorování jsou méně přísné požadavky. Aby se tyto požadavky splnily, používaly se

v minulosti proudové senzory pracující na bázi Hallova jevu. Vysokonapěťová izolace je v těchto obvodech provedena formou galvanické izolace. Třebaže jsou tyto obvody široce rozšířené, představují občas úzký profil z hlediska moderní integrace. Senzory pracující na základě Hallova jevu mají velké mechanické rozměry a nejsou kompatibilní s běžnými pouzdry integrovaných obvodů v důsledku své elektromagnetické konstrukce. [9]

7 Realizace čidla proudu s výstupem PWM (IR2172)

7.1 Charakteristika čidla proudu:

Jedná se o lineární snímač proudu určený zejména pro aplikace řízení motorů. Proud je snímán na rezistoru a umožňuje realizaci lineární proudové zpětné vazby se snadným připojením prostřednictvím PWM výstupu. Obvod má kromě PWM digitálního výstupu navíc samostatný výstup pro indikaci nadproudu s otevřeným kolektorem, která je provedena diodou LED. Aby bylo zajištěno galvanické oddělení čidla IR2172 od ostatní elektroniky, je do obvodu zařazen optoelektrický vazební člen 6N136. K odfiltrování PWM a získání analogového signálu slouží dva filtry typu dolní propust, a to jednopólový pasivní RC filtr a dvoupólový aktivní filtr typu Butterworth. Pro ověření základních vlastností tohoto čidla jsou do obvodu zapojeny dvě svorky S6 a S7, které umožňují přes dělič napětí přivádět na vstup senzoru napětí. Celý obvod je napájen dvěma transformátory, z nichž jeden BV EI 305 2058 je zapojen jako symetrický zdroj napětí. Současně tyto transformátory zajišťují galvanické oddělení.

7.2 Základní funkce a realizace čidla

Tento integrovaný lineární proudový snímač je určen k transformaci informace o snímaném proudu ze silové části obvodu pro napájení motoru do nízkonapětového obvodu.

Analogový vstupní signál představuje ve skutečnosti úbytek napětí na vnějším snímacím odporu. Tento snímací odpor snímá fázový proud motoru a vytváří malé střídavé napětí, které představuje vstupní signál integrovaného proudového snímače IR2172. Maximální hodnota vstupního signálu činí 260 mV, takže snímací odpor lze zvolit tak, aby požadované nastavení pro nadproud, který protéká tímto obvodem, vytvořilo napětíový úbytek 260 mV.

Vstupní střídavý signál je konvertován na signál PWM v části s vyšším napětím integrovaného obvodu IR2172 s nosnou frekvencí 40 kHz. PWM signál se z hlediska úrovně posune dolů k nízkonapětovému referenčnímu zemnímu obvodu.

Vývod PO reprezentuje PWM výstup ve tvaru otevřeného kolektoru, což znamená, že ho lze snadno navázat na libovolný řídicí obvod s pracovním napětím od 3,3 V do 15 V. V důsledku toho, že výstup představuje otevřený kolektor, je nutné vývod PO připojit k nízkonapětové části řídicího obvodu napájení přes předřadný odpor (velikost předřadného odporu závisí na požadovaném vstupním proudu obvodu, na který je navázán výstup PO). V mém případě jsem použil odpor o velikosti 625 Ω .

Existují dvě možnosti zpracování výstupního signálu z integrovaného proudového snímače:

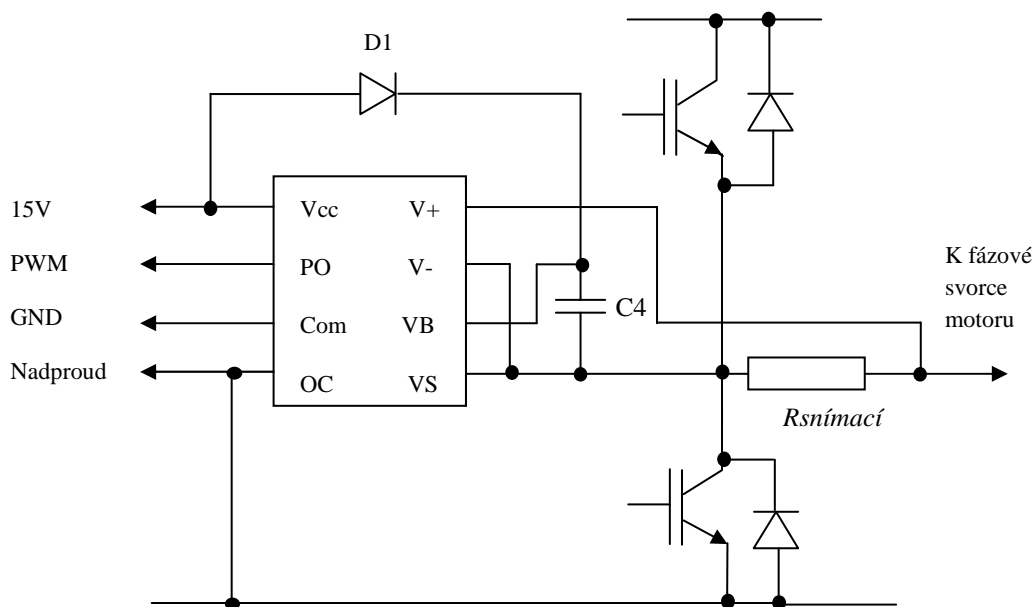
1. Použití filtru k odfiltrování nosné frekvence a opětovnému získání analogového proudového signálu.
2. Navázat výstup přímo na nízkonapětovou stranu digitálního řídicího obvodu (tj. mikrořadiče nebo DSP) a k výpočtu proudu využít softwarového algoritmu.

Vysoké plovoucí (neuzemněné) napájecí napětí v rozmezí VB a VS se vytváří pomocí obvodu bootstrap (tj. zesilovač s kladnou zpětnou vazbou na zatěžovací impedanci), který popisují v další kapitole.

7.2.1 Obvod Bootstrap

Napájecí napětí VBS představuje plovoucí napětí posazené na temeni napětí VS (které má ve většině případů obdélníkový průběh o vysokém kmitočtu). Napájecí napětí pro bootstrap je tvarováno diodou a kondenzátorem viz. obr. č. 10.

Funkce obvodu je následující: pokud se napětí VS vztáhne k zemi (buď přes nízkonapětovou část FET nebo zátěž, podle konfigurace obvodu), tak se bootstrap kondenzátor (C4) nabije přes bootstrap diodu (D1) z napájecího napětí 15V Vcc. Tím pádem poskytne napájení pro VBS. Pokud se VS vztáhne k vyššímu napětí přepnutím pomocí přepínači na vyšší napětí, bude napájecí napětí VBS plavat a dioda bootstrap se zavře, čímž se odpojí napájecí napětí.



Obrázek č. 10: Typické obvodové zapojení IR2172

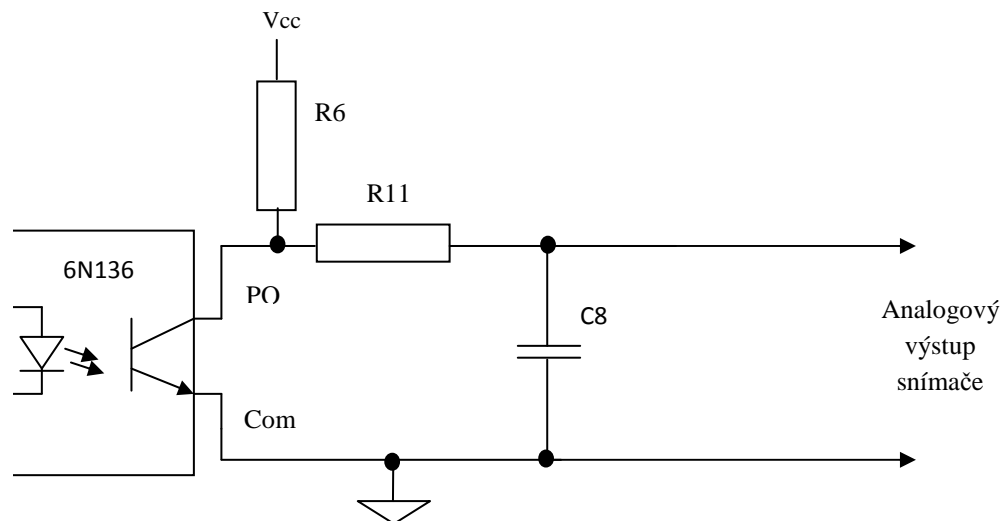
7.3 Získání analogového proudového signálu na výstupu

7.3.1 Pasivní filtry

Nejjednodušší variantu představuje základní RC filtr typu dolní propust neboli integrační článek. Tento druh filtru nemá ostrou závěrnou hranu, nýbrž hranu s typickým sklonem 6 dB/oktávu. Bod -3 dB jsem navrhl v blízkosti 10 kHz.

$$f_m = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{6,28 * 33 * 10^3 * 470 * 10^{-12}} = 10260 \text{ Hz}$$

$$\tau = R * C = 15,51 \mu s$$



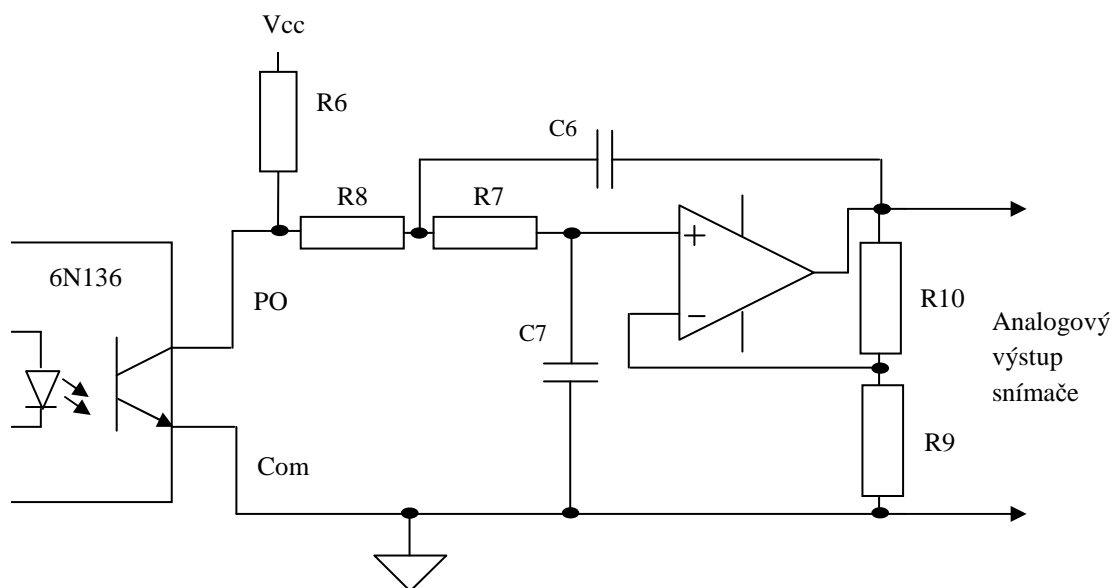
Obrázek č. 11: Jednopolový pasivní RC filtr

7.3.2 Aktivní filtry

Aktivní filtry mají typicky strmější závěrnou hranu než pasivní filtry a plošší propustné pásmo, takže v případech, kdy je třeba propouštět frekvenci menší než frekvenci mezní a odfiltrovat frekvenci 40 kHz, vykazují příznivější vlastnosti. Pro zde uvedený příklad je použit jednostupňový dvoupólový filtr. Obvod představuje Butterworthův filtr se ziskem 19 dB. Mezní frekvence je nastavena na 8,8 kHz.

$$f_m = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{6,28 * 12 * 10^{-3} * 1,5 * 10^{-9}} = 8850 \text{ Hz}$$

$$A_u = \frac{R10 + R9}{R9} = \frac{R10}{R9} + 1 = \frac{18000}{1000} + 1 = 19 \text{ dB}$$



Obr. č. 12: Dvoupólový aktivní filtr Butterworth

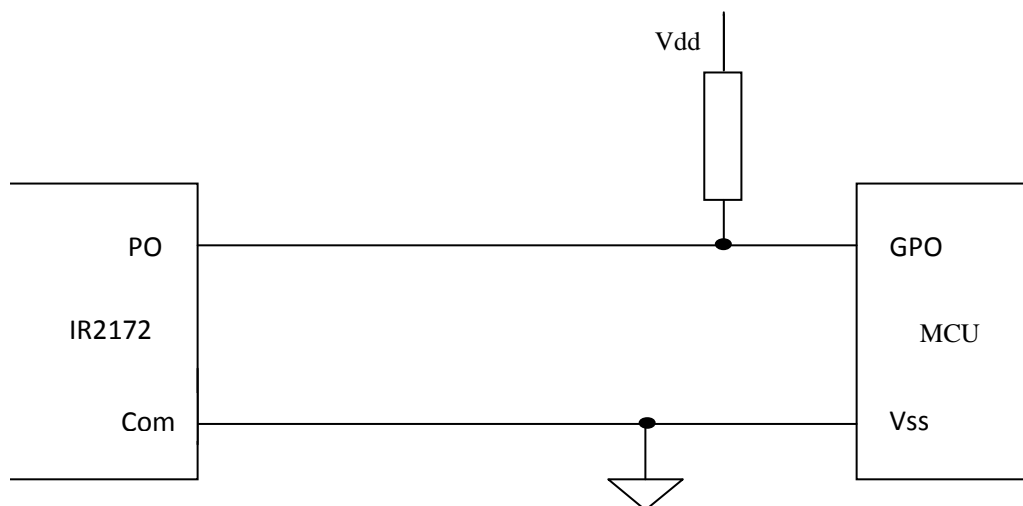
7.3.3 Propojení výstupu s digitálními obvody

Propojení IR2172 s digitálními řídicími obvody jako jsou mikrořadiče nebo DSP procesory (obvody pro konverzi a digitální zpracování signálu) je mnohem jednodušší z hlediska hardware. Propojení pomocí softwarového algoritmu vyžaduje více práce. Avšak tímto způsobem budou omezeny chyby zavedené filtračními obvody. Obvody IR2172 byly původně navrženy pro tento způsob použití.

7.3.3.1 Propojení pomocí hardware

Protože výstup PO integrovaných obvodů IR2172 představuje výstup s otevřeným kolektorem, tak propojení s digitálním řídicím obvodem vyžaduje použít omezovací odpor zapojený v napájecí větvi řídicího obvodu tvořeného mikrořadičem nebo DSP procesorem, s Vdd buď 3,3 V nebo 5 V, takže zapojení by vypadalo podobně jako na obr. č. 13¹

¹ Propojení výstupu s digitálními obvody jsem nerealizoval. Uvádím jej zde jako další příklad pro zpracování digitálního signálu.

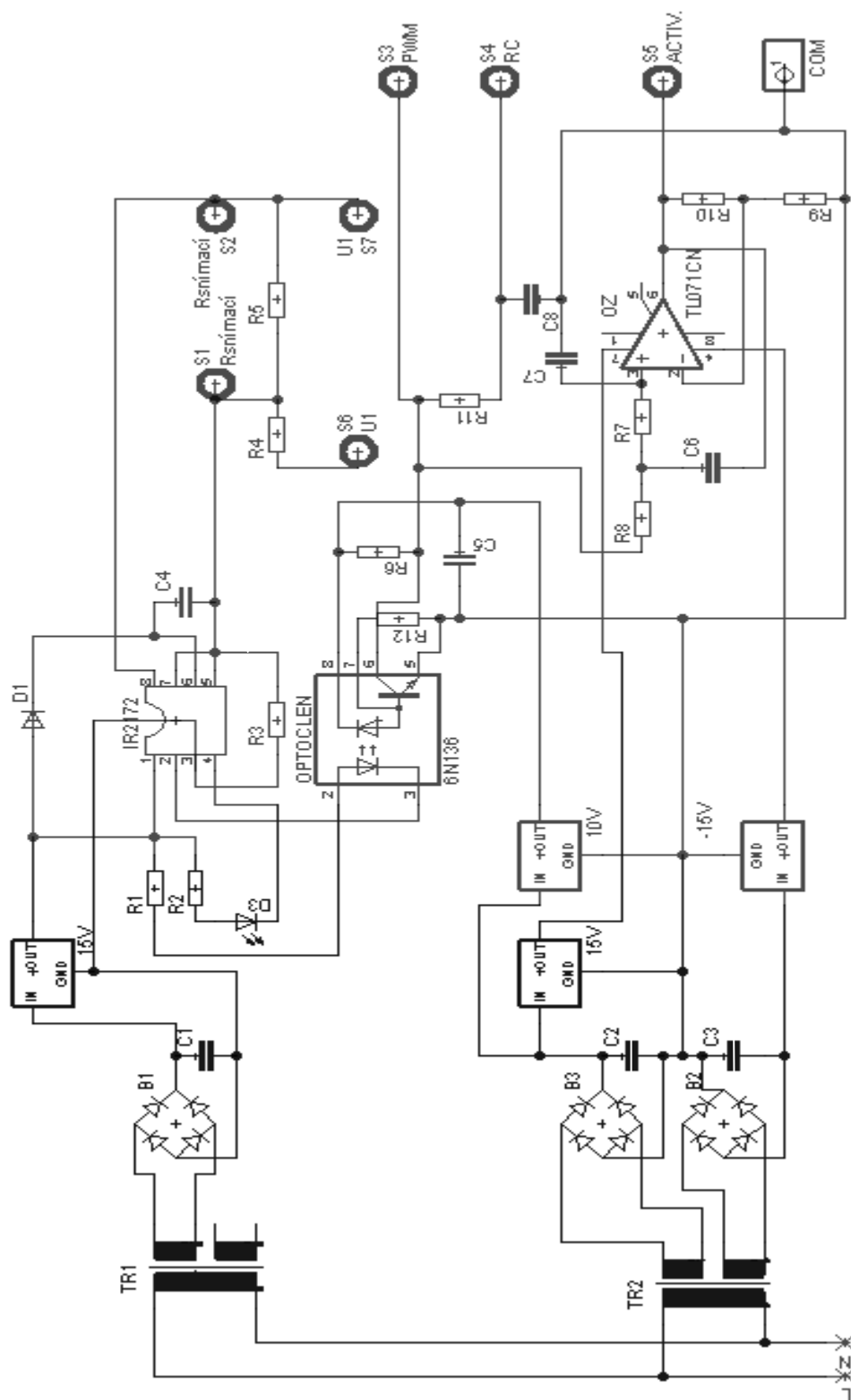


Obr. č. 13: Rozhraní mezi IR2172 a digitálním řadičem

Seznam použitých součástek:

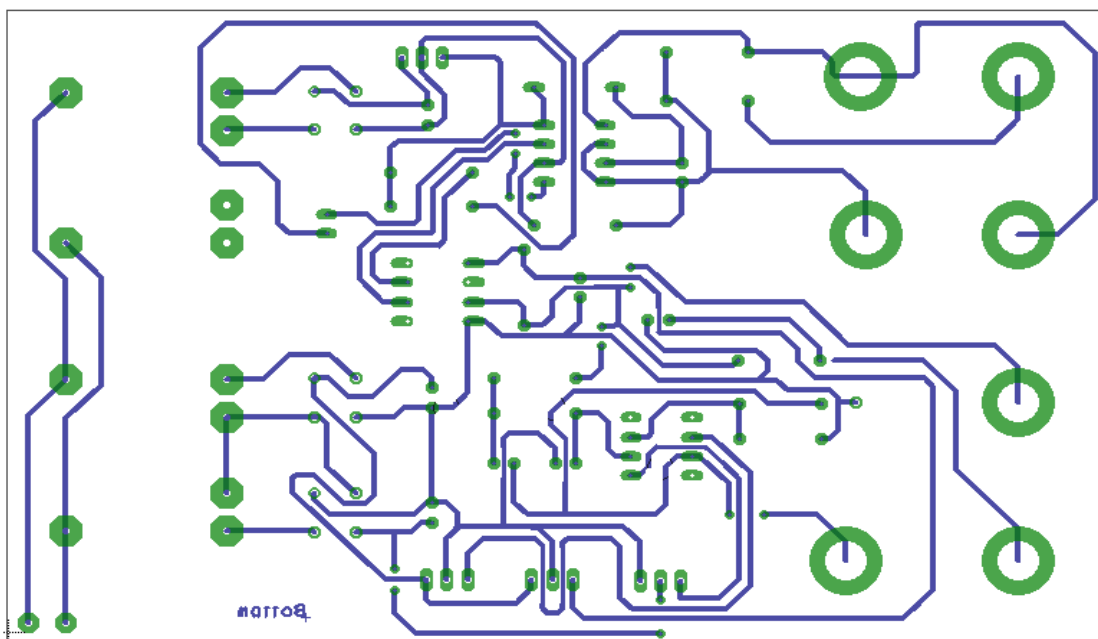
R1 = 625Ω	R12 = 260kΩ	Usměrňovač - B1,B2,B3 = W06M
R5,R6,R10 = 1kΩ	C1,C2,C3 = 470μF	Senzor proudu - IR2172
R2 = 330Ω	C4 = 10μF	Operační zesilovač - TL071CN
R3 = 10kΩ	C5 = 10μF	Stab. napětí - TS815,TS810,
R4 = 100kΩ	C6,C7 = 1,5nF	- TS7915
R7,R8 = 12k	C8 = 470pF	Transformátor:
R9 = 18k	D1 = 1N401	TR1: - BVEI 303 2038
R11 = 35k	Optočlen - 6N136	TR2: - BVEI 305 2058

Schéma zapojení:



Obr. č. 14: Návrh zapojení čidla proudu

Návrh tištěných spojů:



Obr. č. 15: Návrh tištěných spojů a rozložení elektronických součástek

8 Měření na čidle proudu IR2172 s výstupem PWM

Použité přístroje:

Proudová sonda – LeCroy CPO30, 30A, 50MHz

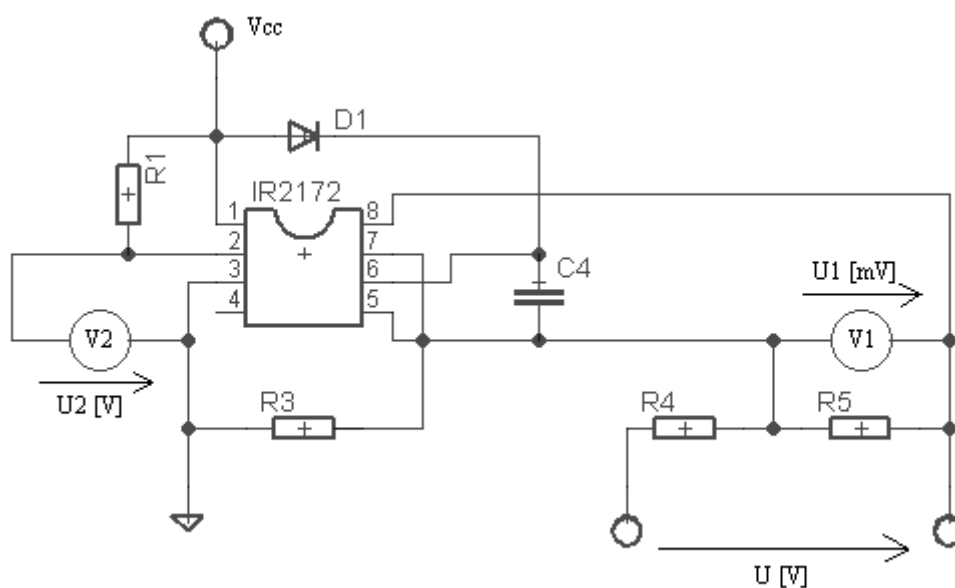
Multimetr – Agilent U1241A

Osciloskop – LeCroy WAVERUNNER 104Xi

Zdroj – V140R50D, Diametral

Rsnímací – 2,7 Ω

8.1 Ověření linearity čidla proudu



Obr. č. 16: Schéma zapojení pro testování linearity čidla proudu

Napětí na vstup senzoru IR2172 se přivádí přes odporový dělič napětí, který je zapojen v poměru 1:100.

$$U_1 = \frac{R5}{R4 + R5} * U = \frac{1000}{101000} * 26 \approx \frac{0,26}{26} \approx \frac{1}{100}$$

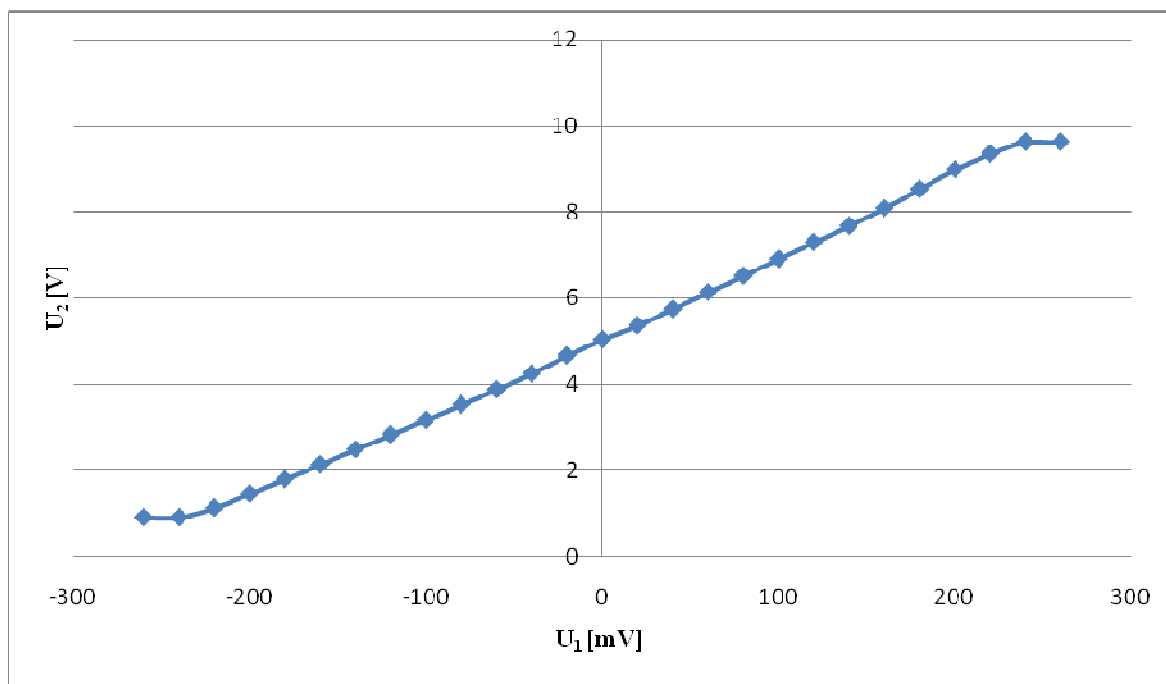
$$U = \frac{U_1 * (R4 + R5)}{R4} = \frac{26000}{1000} \approx \frac{0,26}{26} \approx \frac{1}{100}$$

Tabulka naměřených hodnot:

U ₁ [mV]	-260	-240	-220	-200	-180	-160	-140	-120	-100	-80	-60
U ₂ [V]	0,9	0,9	1,12	1,45	1,79	2,13	2,48	2,82	3,16	3,52	3,87
U ₁ [mV]	-40	-20	0	20	40	60	80	100	120	140	160
U ₂ [V]	4,24	4,46	5,13	5,36	5,74	6,13	6,51	6,9	7,29	7,67	8,08
U ₁ [mV]	180	200	220	240	260						
U ₂ [V]	8,52	8,98	9,35	9,62	9,62						

Tab. 1

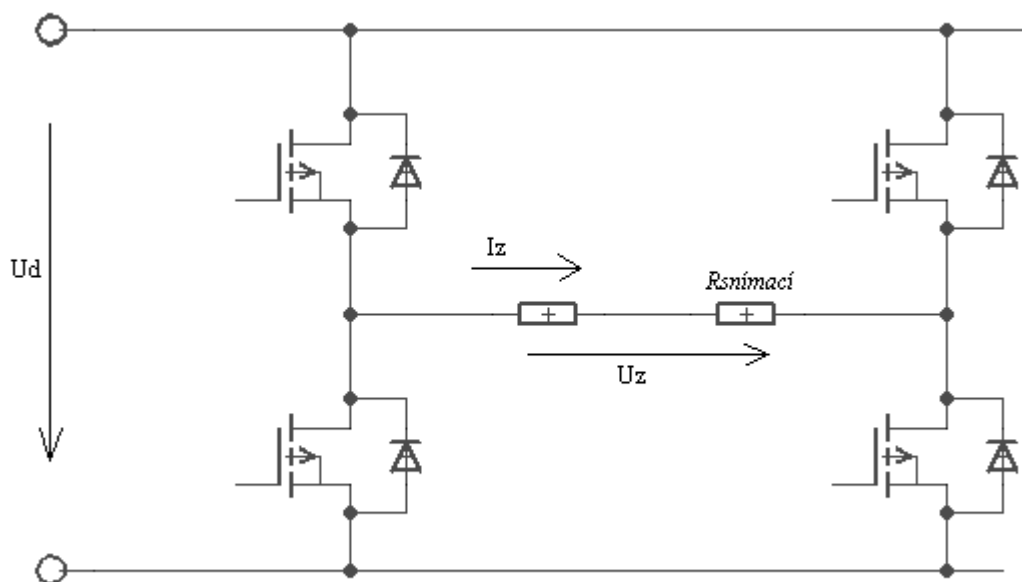
Lineární charakteristika čidla proudu:



Graf č. 1: Převodní charakteristika čidla proudu

8.2 Měření fázového proudu na jednofázovém a trojfázovém střídači

Základní uspořádání jednofázového napět'ového střídače s odporovou zátěží:



Obr. č. 17: Jednofázový napět'ový střídač

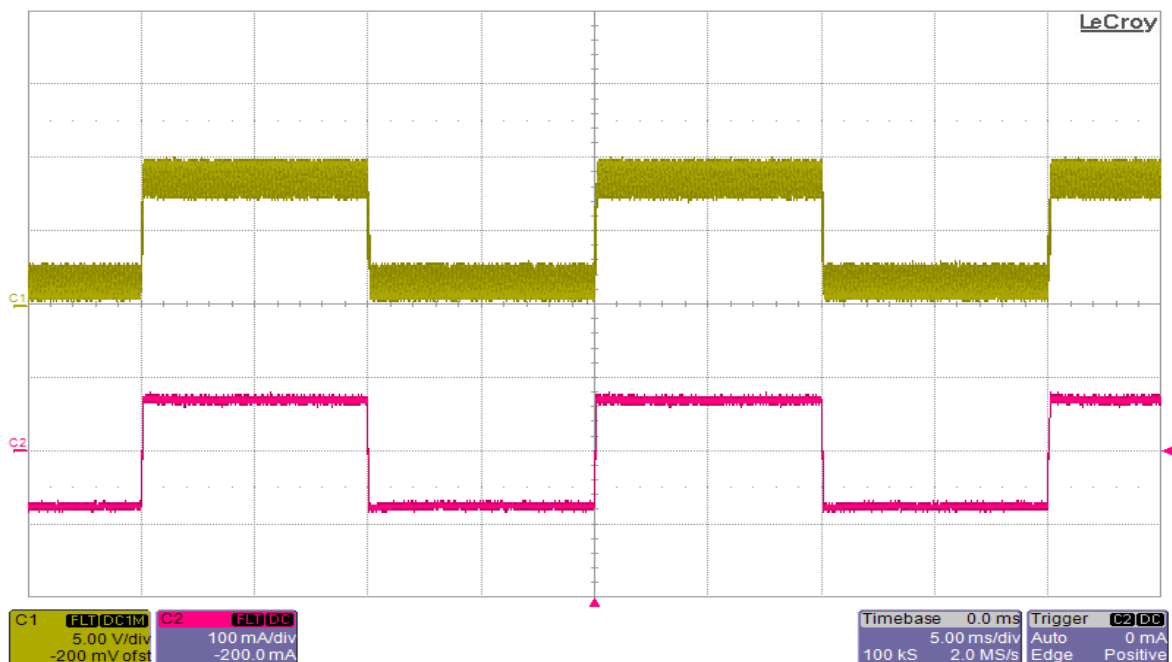
Měření proudu na jednofázovém střídači s odporovou zátěží:

Legenda:

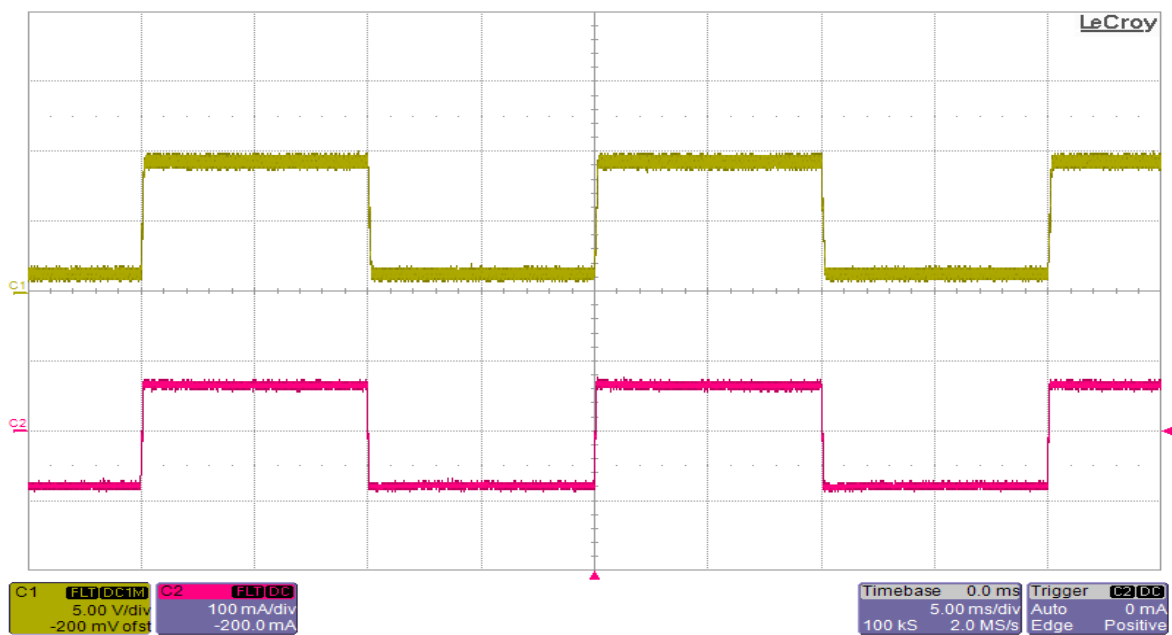
Reálný průběh proudu měřený proudovou sondou



Průběh proudu měřený čidlem IR2172

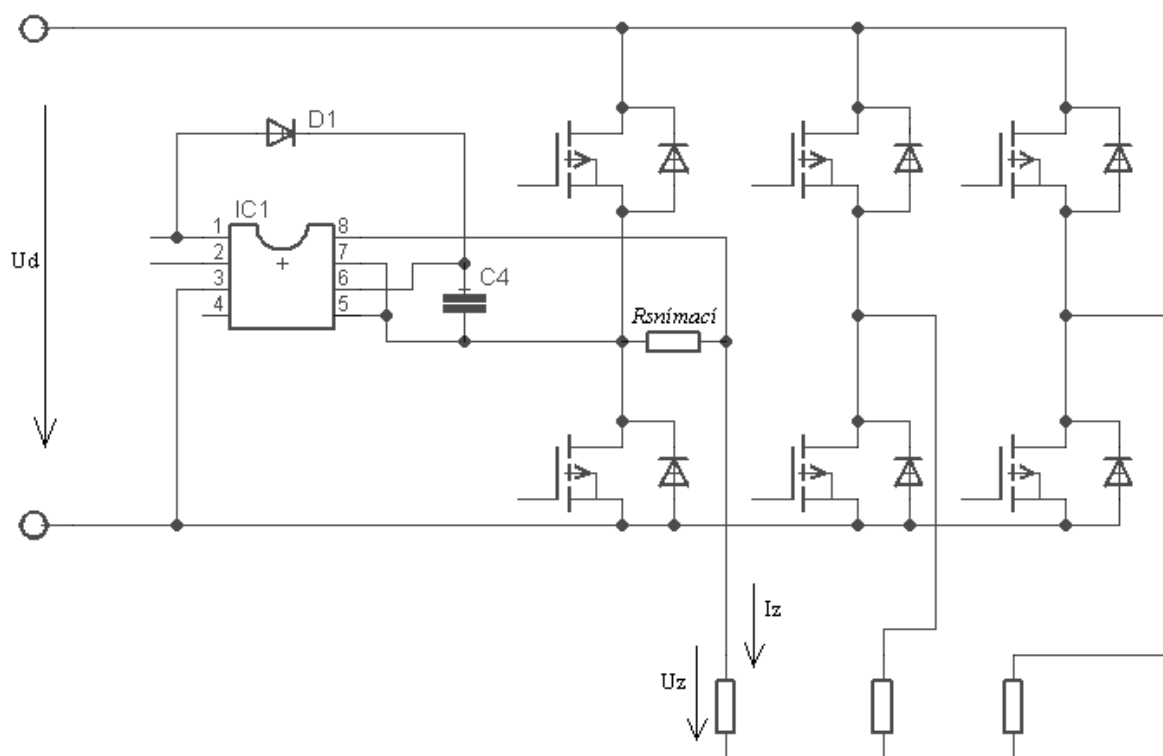


Graf č. 2: Proudový signál na výstupu pasivního filtru



Graf č. 3: Proudový signál na výstupu aktivního filtru

Základní uspořádání trojfázového napět'ového střídače:



Obr. č. 18: Trojfázový napět'ový střídač

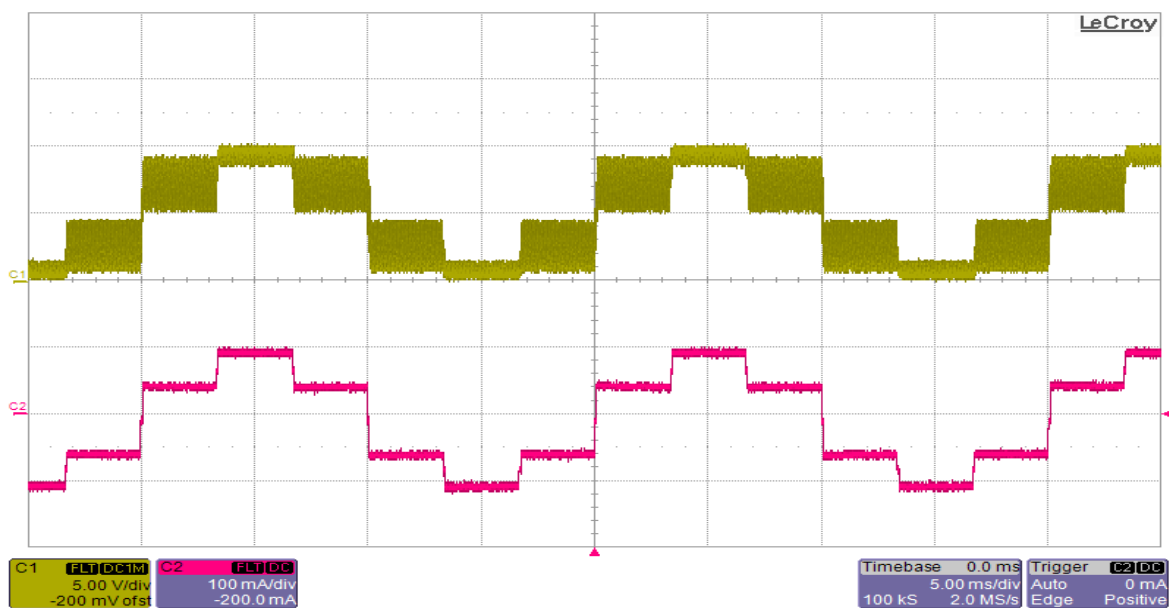
Měření proudu na trojfázovém střídači s odporovou zátěží:

Legenda:

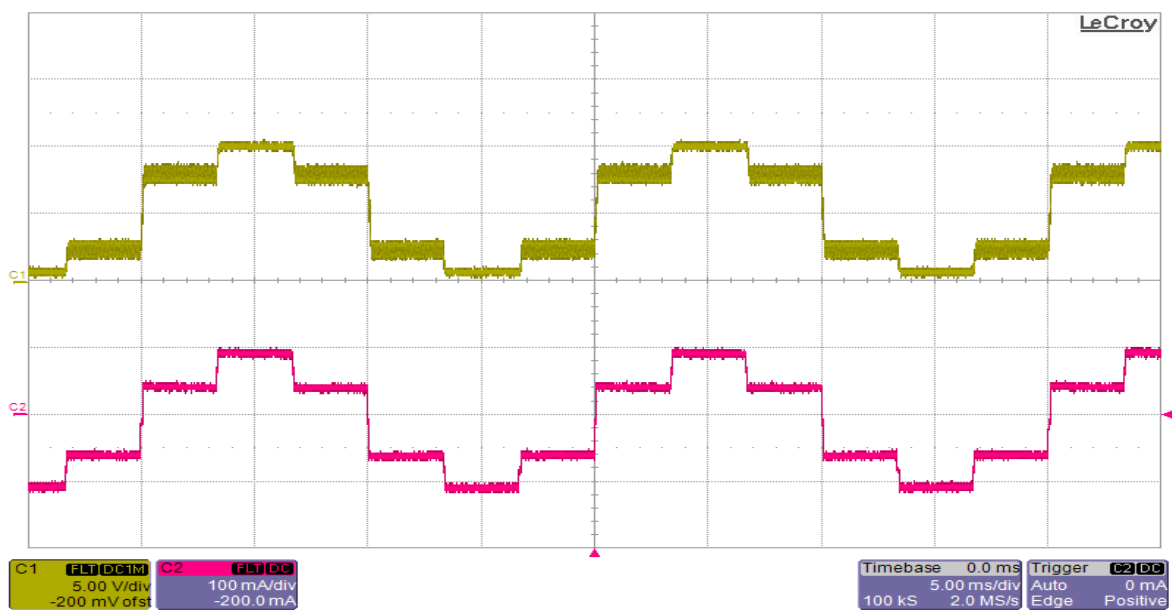
Reálný průběh proudu měřený proudovou sondou



Průběh proudu měřený čidlem IR2172



Graf č. 4: Proudový signál na výstupu pasivního filtru



Graf č. 5: Proudový signál na výstupu aktivního filtru

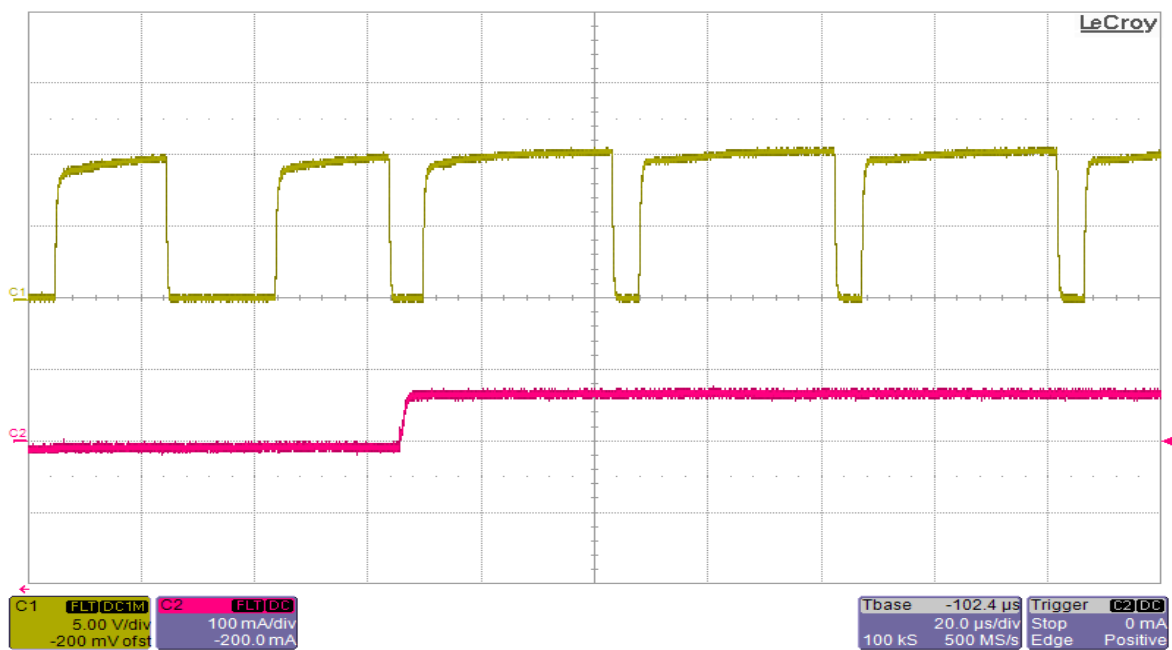
Přechodová charakteristika výstupu PWM:

Legenda:

Průběh proudu při jednotkovém skoku



Průběh PWM signálu na výstupu čidla proudu



Graf č. 6: Odezva proudového čidla na jednotkový skok z 0 A na 70 mA

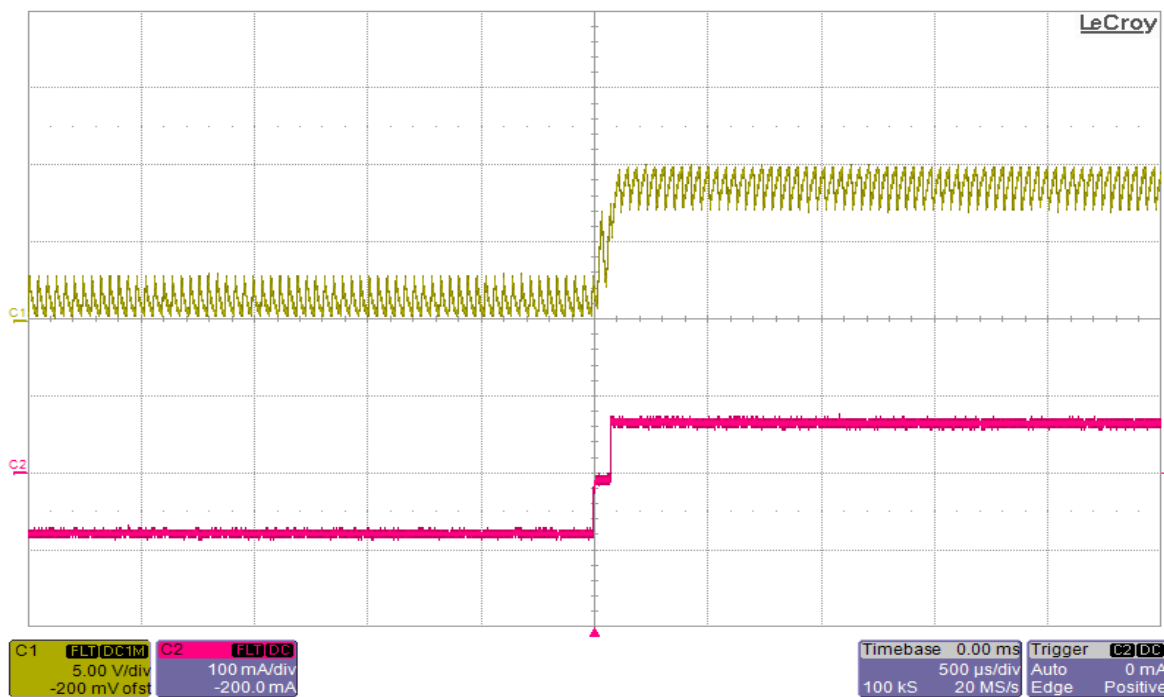
Přechodová charakteristika pasivního filtru:

Legenda:

Průběh proudu při jednotkovém skoku

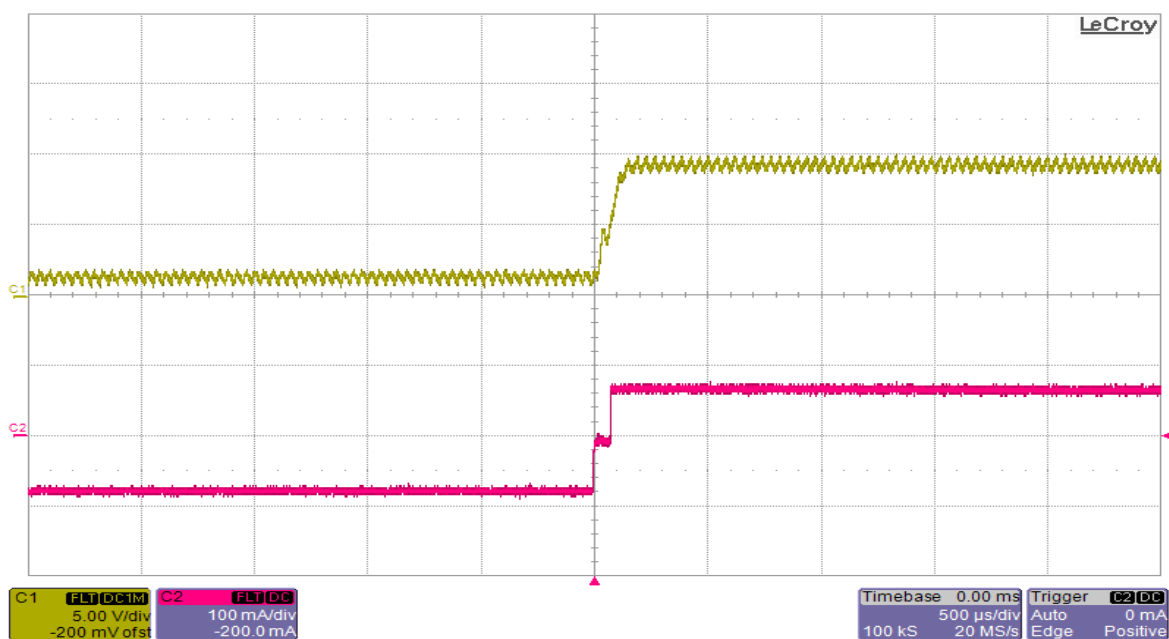


Průběh signálu na výstupu filtru



Graf č. 7: Odezva proudového čidla na jednotkový skok

Přechodová charakteristika aktivního filtru:



Graf č. 8: Odezva proudového čidla na jednotkový skok

9 Závěr

Úkolem první části bakalářské práce bylo uvést jednotlivé typy snímačů proudu a jejich vlastnosti. Z porovnání plyne, že čidla s optoizolátory pro přenos analogového signálu naráží na značné problémy, protože nositelem informace je amplituda. Zatímco u čidel s přenosem impulzního signálu je nositelem informace frekvence nebo délka pulsu.

Čidla s Hallovým generátorem pracují s přesností měření maximálně 1 % u snímačů s otevřenou smyčkou a 0,5 % u snímačů s uzavřenou smyčkou. Používají se v aplikacích, které vykazují funkčně malou náročnost jako např. u měničů, pohonů pro měření vstupních a výstupních proudů, robotika, svářecí stroje.

Snímače založené na technologii Fluxgate dosahují vyšší přesnosti (0,1 % u snímače CT a CD), než snímače založené na principu Hallova jevu. Používají se v aplikacích jako např. pro měření proudu pro systémy s indukčním ohřevem a detekci proudu pro drážní vozidla.

Integrované proudové snímače jsou charakteristické svými malými rozměry, což je jejich hlavní výhoda, neboť snímače založené na bázi Hallova jevu a snímače s optoizolátory znemožňují další zmenšování rozměrů a zjednodušení pohonů na střídavý proud v důsledku svých značných mechanických rozměrů a počtu přídatných periferních zařízení.

Prakticky jsem ověřil vlastnosti realizovaného proudového čidla. Statickou převodní charakteristiku jsem měřil pro celý vstupní rozsah čidla tj. od -260 mV do 260 mV. Z převodní charakteristiky (graf č. 1) vyplývá, že naměřená charakteristika je lineární. Je vidno, že při vstupním signálu větším nebo rovno 240 mV a větším nebo rovno -240 mV se výstupní napětí neměnilo. Integrovaný obvod se nachází v saturačním režimu.

Na jednofázovém a trojfázovém střídači s odporovou zátěží jsem snímal fázový proud v zátěži. Z grafů č.2-5 je patrné, že dvoupólový aktivní filtr Butterworth vykazuje příznivější vlastnosti, než jednopólový pasivní filtr RC pro odfiltrování nosné frekvence PWM a získání analogového proudového signálu. Oba dva typy filtrů by se dalo zdokonalit přidáním dalšího stupně.

Odezva čidla na jednotkový skok byla provedena z 0 A na 75 mA, což odpovídá téměř plné výchylce vstupního signálu integrovaného snímače proudu IR2172

$U_1 = R * I = 2,7 * 0,075 = 202,5 \text{ mV}$. Z grafu č.6 je patrné, že doba reakce čidla na jednotkový skok je okamžitá. Kde je nulový proud, tam střída PWM odpovídá 50%. Při skokovém nárůstu proudu na 70 mA se střída PWM okamžitě mění na 90 %.

Odezva pasivního a aktivního filtru (Graf č. 7,8) vykazuje určité zpoždění za jednotkovým skokem, než signál dosáhne ustáleného stavu. Toto zpoždění je dáno časovými konstantami typickými pro daný filtr. Dále je toto zpoždění ovlivněno časovým intervalem tzv. mrtvou dobou

(časová prodleva mezi přepnutím horního a dolního spínače střídače, aby nedocházelo ke krátkodobým zkratům napájecího zdroje).

Měření na čidle IR2172 ověřilo, že toto čidlo je velice přesné a lineární.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Encyklopedie fyziky. Elektřina a magnetismus [online]. *Fyzika.jreichl*, ND [cit. 2010-1-22]. Dostupný z WWW: <http://fyzika.jreichl.com/index.php?sekce=browse&page=219>
- [2] Wikipedia, otevřená encyklopedie. Elektrický proud [online]. *Wikipedia*, ND [cit. 2010-1-22]. Dostupný z WWW: http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrick%C3%BD_proud
- [3] Petr Beneš. Inteligentní snímače [online]. *Roznovskastredni*, ND [cit. 2009-12-6]. Dostupný z WWW: <http://www.roznovskastredni.cz/dwnl/pel2009/09/benes.pdf>
- [4] Čidla napětí a proudu [online]. *Feil.vsb*, ND [cit. 2009-11-19]. Dostupný z WWW: <http://feil.vsb.cz/kat448/old/Studium/Materialy/TPREP/Cidla.pdf>
- [5] Wikipedia, the free encyclopedia. Opto-isolator [online]. *Wikipedia*, ND [cit. 2009-11-27]. Dostupný z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Opto-isolator>
- [6] KRISTEK, V. *Snímače proudu pro automatizaci*. Ostrava: Vysoká škola báňská – TUO, 2008
- [7] Snímače elektrického proudu [online]. *Honeywell*, ND [cit. 2009-11-3]. Dostupný z WWW: www.honeywell.sk/?com=documents&id=91
- [8] Snímače proudu s uzavřenou smyčkou [online]. *Atecom*, ND [cit. 2009-12-9]. Dostupný z WWW: <http://www.atecom.cz/produkty/sensing-control/elektronicke-sensory/snimace-proudu/snimace-proudu-uzavrenou-smyckou/>
- [9] Isense [online]. *irf*, ND [cit. 2010-2-3]. Dostupný z WWW: <http://www.irf.com/technical-info/whitepaper/isense.pdf>
- [10] LEM. Isolated current and voltage transducers [online]. *LEM*, ND [cit. 2009-11-29]. Dostupný z WWW: http://www.lem.com/images/stories/files/Products/P1_5_1_industry/CH24101E.pdf